

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240262.

专题:海洋通信与传感网络

孙林,毛萌,张璐,等. 耦合多芯光纤跨洋传输中的模式依赖损耗研究[J]. 光通信研究, 2025(4): 240262.

Sun L, Mao M, Zhang L, et al. Research on the Mode Dependent Loss in the Trans-oceanic Coupled-core Multi-core Fiber Links [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 240262.

耦合多芯光纤跨洋传输中的模式依赖损耗研究(特邀)

孙林,毛萌,张璐,王伟业,刘宁,沈纲祥

(苏州大学电子信息学院,江苏 苏州 215031)

摘要:【目的】现阶段超过99%的国际数据正在海底光缆中传输,海缆系统主要存在供能受限与物理空间受限的难题,多芯光纤(MCF)被认为是下一代海缆系统的潜在解决方案。耦合多芯光纤(CC-MCF)因其具备更高的空间复用密度,适用于物理空间受限的海缆系统以作为扩容的关键传输媒介。针对制约CC-MCF传输性能提升的关键损伤之一——模式依赖损耗(MDL),文章聚焦于CC-MCF跨洋传输中的MDL机理与抑制技术,旨在探究异质MCF的空间模式色散(SMD)对MDL估计与抑制的性能影响。【方法】具体地,通过建立基于耦合薛定谔方程的4芯CC-MCF跨洋传输模型,并基于仿真模型进行自洽验证,探究了不同链路SMD条件下,基于多输入多输出(MIMO)抽头的MDL估计的准确度演变规律。同时,探究SMD影响下基于Hadamard变换的空时编码(STC)技术方案的MDL抑制性能。【结果】结果表明,低于10 ps/km的SMD系数有助于实现准确的MDL估计,同时实验验证了采用基于Hadamard变换的STC技术在4芯CC-MCF传输系统中,当存在10 dB MDL时可以带来超过5.5 dB的Q值增益。【结论】文章研究结果基于理论仿真与实验验证,综合分析了CC-MCF链路的损伤估计与抑制,有望为下一代高空间复用密度的CC-MCF海缆通信技术提供重要参考。

关键词:空分复用;耦合多芯光纤;跨洋传输;海底光通信;模式依赖损耗

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Research on the Mode Dependent Loss in the Trans-oceanic Coupled Core Multi Core Fiber Links

SUN Lin, MAO Meng, ZHANG Lu, WANG Weiye, LIU Ning, SHEN Gangxiang

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215031, China)

Abstract: 【Objective】Over 99% international data are transmitted over optical submarine cables. However, the main challenges of optical submarine communications are the feeding power and mechanical size limitation. Coupled Core-Multi Core Fibers (CC-MCF) are well-suited for submarine cable systems with physical space limitations, as they offer higher spatial multiplexing density and serve as an effective key transmission medium for expanding capacity. One of the critical impairments limiting the enhancement of transmission performance in CC-MCF is Mode Dependent Loss (MDL). This paper focuses on the mechanism of MDL in transoceanic transmission using coupled MCF, aiming to investigate the impact of Spatial Mode Dispersion (SMD) in heterogeneous CC-MCF on the estimation and mitigation of MDL. 【Methods】Specifically, by establishing a coupled 4-core transoceanic transmission model and conducting self-consistent validation, this study explores the evolution of the accuracy of MDL estimation based on Multiple In Multiple Out (MIMO) taps under different SMD conditions. Additionally, it also investigates, for the first time, the MDL mitigation performance of a space-time coding technique based on the Hadamard transform under the influence of SMD. 【Results】The results indicate a low level of SMD coefficient below 10 ps/km is helpful to the efficient MDL estimation and mitigation. Moreover, the use of Space Time Coding (STC) has provided a 5.5 dB Q factor gain to our 4-core CC-MCF transmission system. 【Conclusion】This paper provides a comprehensive analysis of the actual transmission characteristics of CC-MCF. Its findings offer valuable insights into the potential development of next-generation CC-MCF submarine cable communication technologies, particularly those aiming for high spatial multiplexing density.

Key words: spatial division multiplexing; CC-MCF; submarine transmissions; subsea communications; MDL

0 引言

现阶段海缆系统存在两方面的关键挑战:①供能受限:目前大部分(少部分特殊应用海缆由水下储能单元供电)通信海缆由海岸两端的电压差供电,以提供海底中继器的能耗;②物理空间受限:考虑制备

与铺设难度,通常容量光纤数目为32对纤。针对能效问题,更高效的供能器件(Power Feeding Equipment, PFE)与更高电/光转换效率的光放大器需求迫切^[1-2];针对物理空间受限问题,采用多芯光纤(Multi Core Fiber, MCF)的空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)方式开始引起广泛关注,并

收稿日期:2024-12-13;

修回日期:2024-12-31;

纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62475178);国家科技部重点研发资助项目(2023YFB2906300)

作者简介:孙林(1992-),男,河南信阳人。副教授,博士,主要研究方向为新型光通信光纤和器件。

通信作者:孙林,副教授。E-mail: linsun@suda.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

已被证明是提升海缆传输容量的有效方法^[3-4]。2023年,Google与NEC合作铺设了国际上首条MCF海缆^[5];2024年,国内海洋龙头企业亨通华海联合苏州大学和浙江大学发布了32对纤的混纤海缆,并探究了MCF成缆过程中偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)的演变规律,指出MCF海缆系统需要更为苛刻的PMD管理措施^[6]。

另一方面,为了支撑实现更高通信容量的海缆系统,亟需更高空间复用密度的MCF。耦合型多芯光纤(Coupled Core-MCF, CC-MCF)被理论证明在跨大西洋7 000 km与跨太平洋14 000 km场景下,相比非耦合型MCF具备更高的通信容量^[7]。

本文聚焦研究了CC-MCF中的模式依赖损耗(Mode Dependent Loss, MDL)机理与抑制技术,首先探究了MDL导致的中断容量与中断概率问题,同时通过建立基于耦合薛定谔方程的CC-MCF海缆传输模型,以验证空间模式色散(Spatial Mode Dispersion, SMD)影响下的MDL估计与抑制的性能演变规律,最后通过传输实验研究了MDL抑制技术的有效性。本文公开的研究有望为下一代基于CC-MCF的海缆通信提供重要参考与技术储备。

1 MDL机理与抑制

MDL是指在SDM系统中,由于各种因素导致不同空间模式的光信号在传输过程中经历不同损耗,这种损耗差异会影响系统的传输效率和信号质量。MDL造成的原因主要来源于两方面:①光纤层面:MCF在铺设过程中可能发生的弯曲、扭转和熔融误差等,以及MCF制造过程中的工艺不完备都可能导致MDL;②SDM/解复用器(针对MCF即扇入扇出耦合器):SDM/解复用器是SDM系统的关键器件,这些器件的性能差异和制造工艺的不完善也会导致MDL。针对 N 芯光纤海缆系统,其单向双偏振容量 C 可由香农容量公式给出:

$$C = 2 \times \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \lambda_i \frac{P_S}{P_N} L \right), \quad (1)$$

式中: λ_i 为传输矩阵与其共轭转置矩阵乘积的特征值; P_S 为信号功率; P_N 为噪声功率; $\frac{P_S}{P_N} L$ 为SDM平均信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),归一化因子 $L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i$ 。

为了计算MDL影响的中断容量与中断概率,定义SDM系统的传输矩阵为 H ,需要随机产生特

定MDL条件下的多个信号传输矩阵 H 以便进行蒙特卡洛仿真。归一化因子 L 的各个空间模式的贡献 λ_i 为 HH^T 的 N 个特征值。因此,当 N 芯光纤海缆系统不存在MDL时, λ_i 全为1,此时容量 $C(\lambda_i)$ 达到其理论最大值。首先定义单跨MDL(MDL_S)为所有空间模式中功率衰减最大值与最小值的比值:

$$MDL_S = \frac{\max(V)}{\min(V)}, \quad (2)$$

式中: V 为所有空间模式的功率分量并满足 $\sum_{i=1}^N V = N$ 。因此可以根据特定的MDL值产生多个不同的 V 组合,实现多次传输矩阵 H 的蒙特卡洛仿真。 V 与 H 的关系为

$$H = U \times V \times U', \quad (3)$$

式中: U 为一个随机酉矩阵; U' 为矩阵 U 的转置。通过生成特征值满足给定MDL值的传输矩阵,并将特征值 λ_i 与SNR代入式(1)计算容量 C ,由多次仿真 C 的累积分布值得到中断概率。图1所示为不同SNR与MDL条件下,5 000 km(50 km单跨,100跨段)4芯光纤的中断概率与中断容量 C 的关系曲线。选取SNR=10、15 dB、MDL值从0.5到2.0 dB进行仿真。由图可知,可实现的多输入多输出(Multiple In Multiple Out, MIMO)容量随着MDL的增加而下降。另一方面,信道的中断概率随着SNR的增大而降低。

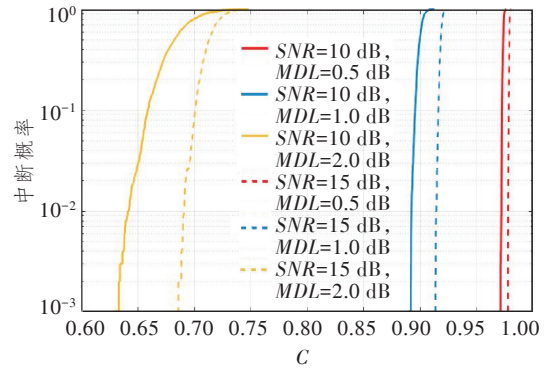


图1 不同SNR与MDL条件下的中断概率与中断容量 C 的关系曲线

Figure 1 The relationship of the outage probability and outage capacity C under different conditions of SNR and MDL

综上所述,MDL对于SDM长距离跨洋传输系统影响较大,因此针对MDL的准确估计与高性能抑制是至关重要的。针对长距离链路的整体MDL估计,常用的技术是基于接收端MIMO抽头获取对应空间模式的SNR,以估计整理链路积累的

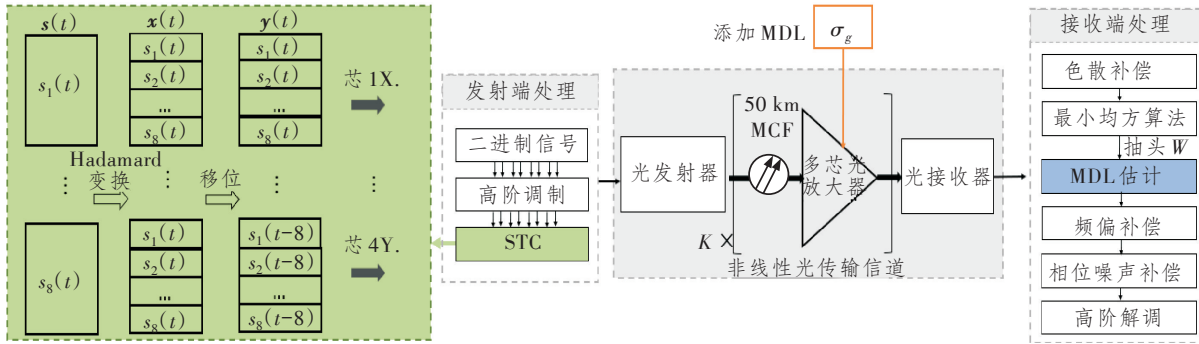
MDL 值。

针对系统 MDL 抑制方面,常用的技术手段为 空时编码(Space Time Coding, STC)。STC 抑制 MDL 的基本原理在于通过发射端的编码技术将信号分成多个空间模式进行编码,当 SDM 光纤信道中存在 MDL 时,多路编码信号可以遍历到具备不同衰耗的空间模式,从而降低 MDL 对整体 SDM 通信系统性能的影响。

如图 2 所示,本文针对 MCF 端到端的链路累计 MDL 估计,采用的是基于 MIMO 抽头的 MDL 估计。为了衡量 MDL 估计的准确度,本文采用理论 MDL 的均方根值(Root Mean Square, RMS) MDL_{RMS} 作为参考。端到端链路累计的 MDL_{RMS} 可由单跨 MDL 值 σ_g 与跨段数 K 推导:定义 $\epsilon = \sigma_g \sqrt{K}$, SDM 模式数目为 $2N$, 则 $MDL_{RMS} =$

$\epsilon \sqrt{1 + \epsilon^2 / \left(12(1 - \frac{N^{-2}}{4}) \right)}$ 。对于估计值来说,基于最小均方误差(Least Mean Squares, LMS)算法的 MIMO 抽头矩阵假设为信道传输矩阵的逆,因此信道传输矩阵 H 可由 MIMO 抽头矩阵求逆获得。计算基于估计的矩阵 H 的 N 个特征值 λ_i 的 RMS,并对比理论 MDL 值。

另一方面,本文采用基于 Hadamard 变换的 STC 技术实施 MDL 抑制。由于基于 Hadamard 变换的 STC 技术与传统 LMS 均衡器兼容,因此具有较低的部署复杂度。定义 Hadamard 变换矩阵为 Z_{2N} ,其维度等于空间模式数目,针对 $2N$ 路并行的 SDM 信号 $S(t) = [s_{1(t)}, s_{2(t)}, \dots, s_{N(t)}]^T$, STC 编码过程可由矩阵相乘实现 $x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} Z_{2N} S(t)$ 。



注: $y(t)$ 为移位后的编码信号。

图 2 针对 CC-MCF 多跨段传输链路的 MDL 估计与抑制示意图

Figure 2 The schematic of MDL estimation and mitigation for multi-span CC-MCF links

2 分析与讨论

针对图 2 所示的系统架构,本文基于耦合薛定谔方程模拟了 4 芯 CC-MCF 的传输过程,该数值模拟的详细过程读者可以参考文献[7]。系统调制采用 50 GBaud 的双偏振正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)信号,该设置考虑了跨洋传输常用的调制格式以及商用 C80 的 400 Gbit/s 光收发模块在深海环境下的可靠性。将 4 芯 CC-MCF 的衰耗、色散和非线性系数分别设置为 0.16 dB/km、16 ps/(nm·km)和 0.81 W/km,单跨 MDL 设置为 0.7 dB。图 3 所示为不同传输距离下的 MDL 理论值与估计值,其中实线为理论 MDL 值,其具体计算公式为 $MDL_{RMS} = \epsilon \sqrt{1 + \epsilon^2 / \left(12(1 - \frac{N^{-2}}{4}) \right)}$,可知,其与传输距离的关系服从根号增长的关系。图 3 中黄色的散点为基于 MIMO 均衡抽头估算的 MDL

估计值。由图可知,在 $SMD=1$ ps/km 和耦合长度 $L_c=100$ m 条件下,针对不同长度耦合 4 芯链路的 MDL 的估计值与理论值较为接近。另外,MDL 估计值的波动是由于 CC-MCF 随机传输矩阵带来的 MIMO 抽头估计误差导致的。

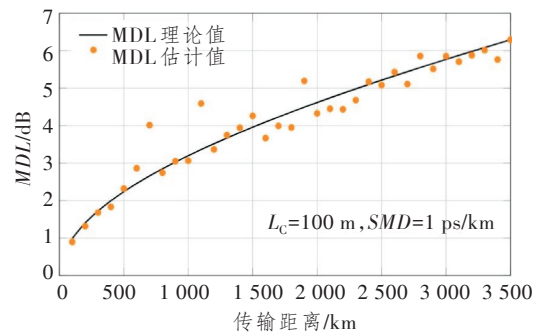


图 3 不同传输距离下 MDL 的理论值与估计值
Figure 3 Values of theoretical and estimated MDL under different transmission distances

然而现阶段 CC-MCF 的 SMD 仍较高[8],同时,

SMD 导致的信道脉冲响应展宽会对接收端 MIMO 均衡带来影响,从而影响 MDL 估计的准确度。因此,本文基于建立的耦合非线性薛定谔传输模型进行了 SMD 对 MDL 估计影响的数值仿真。图 4 所示为 1 000 km 传输距离下,不同光纤 SMD 值对链路 MDL 估计准确度的影响。以理论 MDL 值作为基准,总体趋势为随着光纤 SMD 的增大,MDL 估计的误差也增大。另外,当耦合长度 L_c 下降时,MDL 估计准确度对于 SMD 的鲁棒性会大幅增加。由图可知,当 L_c 降低至 100 m 时,低于 10 ps/km 的 SMD 系数可以支撑较为准确的 MDL 估计性能,这种 SMD 系数水平对于目前国内光纤制备厂商较为容易实现。

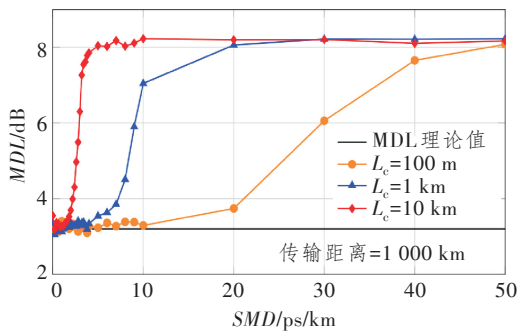


图 4 不同 SMD 条件下 MDL 估计值变化

Figure 4 MDL estimation under different SMD conditions

针对 MDL 抑制方面,图 5 所示为当单跨 MDL 为 0.7 dB 时,不同传输距离下 STC 带来的 Q 增益情况。总体趋势为随着传输距离的增加,信号 Q 值不断下降,这是因为累积的非线性噪声与自发辐射噪声的噪声水平不断上升。图中插图为采用 STC 技术与未采用 STC 技术的 4 芯 CC-MCF 的星座图,由图可知,当未采用 STC 技术时,8 个空间模式的 SNR 存在显著差异,这会导致所有空间模式的总体 Q 值下降。当采用 STC 技术时,8 个空间模

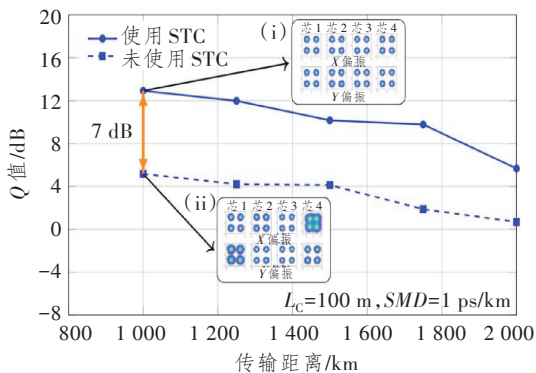
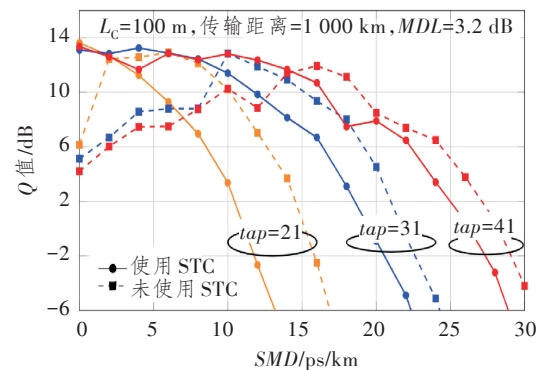


图 5 不同传输距离下 STC 技术的 MDL 抑制性能
Figure 5 Performance of MDL mitigation using STC under different transmission distances

式的 SNR 差异被显著弱化,同时在 1 000 km 传输条件下,采用 STC 技术能够提供超过 7 dB 的信号 Q 值提升。

另一方面,由于采用 STC 技术的基本原理在于将空间模式平均加载到不同时隙用来实现信号在不同模式上的均匀传输,因此 STC 对于信道时域损伤较为敏感。图 6 所示为光纤 SMD 系数对于 STC 性能的影响。这里 SMD 单位为 ps/km,这是因为 SMD 设置是通过不同空间模式的传播常数差异来实现的。针对 CC-MCF 来说,空间模式的强耦合会导致 SMD 值随着距离的根号线性增长。图 6 所示的总体趋势为,当光纤 SMD 系数处于较低水平时,STC 带来的 Q 值增益越为明显。然而,随着光纤 SMD 系数的增加,STC 的 Q 值提升效果被显著恶化。由图可知,STC 的 Q 值增益区间在 SMD 系数小于 10 ps/km 的范围,同时需要对应足够长的 MIMO 均衡抽头配合以实现有效的 MDL 抑制效果。



注:tap 为抽头长度。

图 6 SMD 对 MDL 抑制性能的影响

Figure 6 SMD impact on the MDL mitigation using STC technique

3 实验研究

为了进一步验证 STC 在真实 CC-MCF 传输中的 MDL 抑制性能,本文搭建了基于 19 μm 芯间距的 4 芯 CC-MCF (其截面图如图 7(i) 所示) 的 CC-MCF 传输平台,如图 7 所示。发射端信号处理包括了伪随机二进制信号产生、高阶调制以及 STC 编码。经过数字模拟转换与电/光调制后,相干光信号的正交(IQ)分量携带了调制信息,通过加入光纤延时线的方式进行信号去相关,利用匹配的扇入耦合器注入到 4 芯 CC-MCF 中。值得一提的是,链路的 MDL 是通过调节扇入耦合器前置的光衰减器来实现模拟调节的。经过 50 km 的 CC-MCF 传输

后,利用扇出耦合器与自制的时分复用接收机(其设计图如图 7(ii)所示)相连,实现多路并行 SDM 信号的串并整合,利用 1 台双偏振相干接收机与 1 台 4 通道的实时采样示波器即可实现 4 芯 CC-MCF

传输信号的采集。接收端信号处理包括了色散补偿、频偏补偿(基于导频实现)、维度为 8 的 MIMO 均衡、相位噪声补偿和误码分析等。

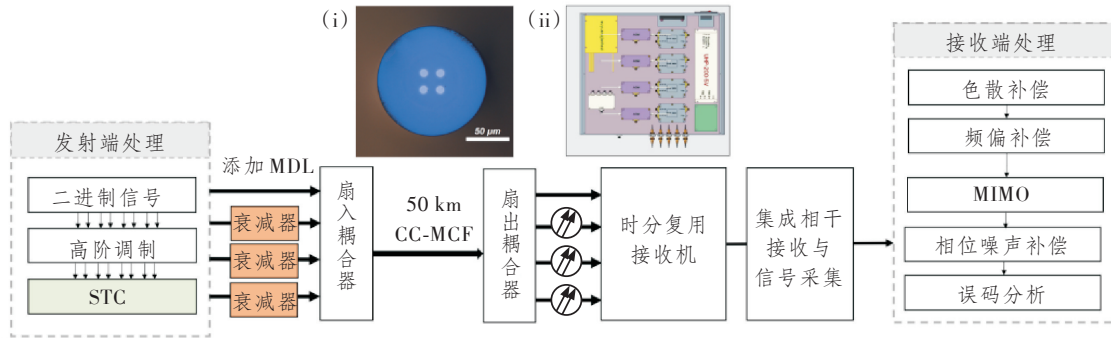


图 7 4 芯 CC-MCF 传输实验框图

Figure 7 Experiment setup of 4-core CC-MCF transmission system

首先我们需要对图 7 中的实验系统进行优化。其中一个关键的优化参数为空间模式的芯间走离。这是因为 CC-MCF 信号处理依赖于更大规模的 MIMO 均衡,芯间走离造成的不同空间模式传输相对时延会造成 MIMO 均衡性能影响。本实验在扇出耦合器前进行光纤熔接,精准地控制不同空间模式的 MIMO 抽头更为聚合,进而最大程度限制了芯间走离效应的影响。图 8 所示为不同芯间走离条件下所需 MIMO 抽头的最短长度以及 Q 值变化曲线。其中,蓝色圆点表示抽头长度,橙色方点表示 Q 值。总体趋势为,随着芯间走离的增加,所需 MIMO 抽头的最短长度呈现线性增加的情况,这是因为,最短 MIMO 抽头需要覆盖链路的单位脉冲响应。此外,尽管 MIMO 抽头覆盖了链路的单位脉冲响应,其 Q 值仍不断下降。因此,针对 CC-MCF 链路芯间走离的调控也至关重要。

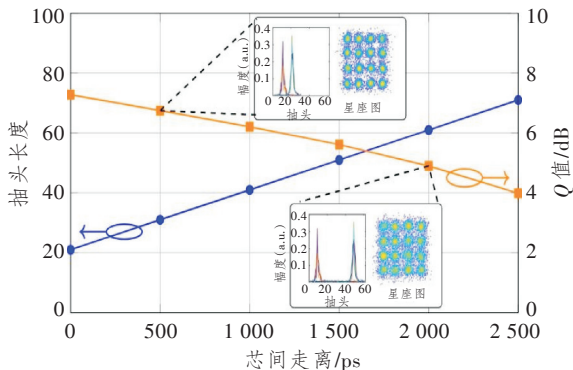


图 8 不同芯间走离条件下的 MIMO 抽头所需长度以及 Q 值

Figure 8 Required MIMO tap length and Q factors under different inter-core skews

基于以上实验的设置与优化,通过在扇入耦合器前置光衰减器来调控链路的 MDL,研究了基于 Hadamard 变换的 STC 的 MDL 抑制性能。图 9 所示为不同 MDL 条件下的 Q 值变化以及 STC 的 Q 值提升情况。总体趋势为,当 MDL 逐步增加时,Q 值呈现不断下降情况,同时在低入射光功率(Launching Optical Power, LOP)情况下的性能下降更为明显。针对 STC 的 MDL 抑制效果,在 MDL 为 10 dB、LOP 为 4 dBm 的情况下,STC 可实现 5.5 dB 的 Q 值增益。

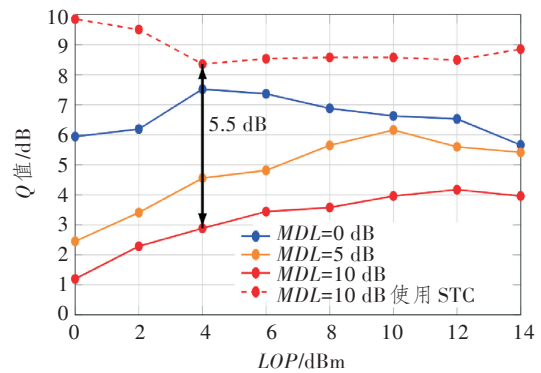


图 9 不同 LOP 条件下的 MDL 抑制效果

Figure 9 Performance of MDL mitigation under different LOP conditions

4 结束语

本文聚焦于 CC-MCF 传输链路中 MDL 的估计与抑制,基于理论模型探究了链路 SMD 对 MDL 估计准确度的影响,结果表明,低于 10 ps/km 的 SMD 系数有助于准确的 MDL 估计。本文同时开展了 50 km CC-MCF 传输实验验证,当 MDL 为

10 dB 时,STC 技术可实现 5.5 dB 的 Q 值增益。由于未来海缆系统的空间复用密度需求的增加,本文关于 MDL 估计与抑制的研究有望为 CC-MCF 长距离传输提供理论参考与技术储备。

参考文献:

- [1] Downie J D. Maximum Cable Capacity in Submarine Systems with Power Feed Constraints and Implications for SDM Requirements [C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2017: 8346124.
- [2] Tang H, Yang C, Qin L, et al. A Review of High-power Semiconductor Optical Amplifiers in the 1 550 nm Band[J]. Sensors, 2023, 23(17): 7326.
- [3] Yuan H, Furdek M, Muhammad A, et al. Space-division Multiplexing in Data Center Networks: On Multi-core Fiber Solutions and Crosstalk-suppressed Resource Allocation[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 272-288.
- [4] Li A, Chen X, Al Amin A, et al. Space-division Multiplexed High-speed Superchannel Transmission over Few-mode Fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3953-3964.
- [5] Quigley B, Cantono M. Boosting Subsea Cables with Multi-core Fiber Technology [EB/OL]. (2023-09-13) [2024-12-10]. <https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/delivering-multi-core-fiber-technology-in-subsea-cables>.
- [6] Xu R, Sun L, Xu G, et al. PMD Impact on MCF Submarine Cables: Reassessing Outage Performance of Transmissions [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(1): 5-8.
- [7] Sun L, Zhang J, Zhou G, et al. Theoretical Investigations of Weakly and Strongly-coupled Multi-core Fibers for the Applications of Optical Submarine Communications under Power and Fiber Count Limits [J]. Optics Express, 2023, 31(3): 4615-4629.
- [8] Hayashi T, Tamura Y, Hasegawa T, et al. Record-low Spatial Mode Dispersion and Ultra-low Loss Coupled Multi-core Fiber for Ultra-long-haul Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3): 450-457.